

山形大学紀要（工学） 第11巻 第1号 昭和45年1月  
Bull. of Yamagata Univ. Eng., Vol. 11 No. 1 Jan. 1970

## 低周波用双共振フィルタの新しい構成法と実験結果

富川 義朗・青木 伴至・近野 正

工学部 電気工学科

### 1. まえがき

近年、電子回路部品素子は  $I. C.$  素子などの発達によりその小形化はめざましく進展している。しかし、フィルタや共振回路などの周波数領域あるいは時間領域ではまだ小形で安定な部品が得られないために、機械振動子や弾性振動を利用した部品素子の需要が増し、他の電子部品にみあうような小形で安定な機械振動子などの研究・開発が急務となっている。これらの要求に対しフィルタなどへの応用部門では、最近、多重モード振動子の研究が盛んで、ドイツ<sup>(1)</sup>、アメリカ<sup>(2)</sup>あるいは我国<sup>(3),(4),(5)</sup>においてそれぞれ独自に研究・開発が行なわれている。多重モード振動子とは一個の振動子に生ずるいくつかの異種あるいは同形振動モードを巧みに利用するもので、従来の機械振動子はそのうちの一共振だけを利用する方式であった。これに対し多重モード振動子を用いたフィルタでは、一個の振動子の二つ以上の共振を巧みに利用して一挙に差動形フィルタ構成をしようとするもので、現在の小形化、高性能化の要求にそうものである。また、この種振動子の利用により、いままで構成することがむずかしかった有極形機械フィルタ<sup>(1),(2)</sup>の新しい構成<sup>(6)</sup>の開発、ならびに発振素子としての応用なども可能となる。

一個の振動子に生ずるいくつかの共振のうち、二つの共振を利用するものを二重モード振動子あるいは双共振子、三個の共振を利用するものを三重モード振動子<sup>(7)</sup>と呼び、一般に多重モード振動子と呼称する。実際には二～三重モードの利用が限度のようで、それ以上の多重共振の利用は、小形化、高性能化が促進される反面、各共振周波数の調整がむずかしくなり、かえって実用性にとぼしくなる。

本文は  $100\text{Hz}$  前後あるいは数  $k\text{Hz}$  から  $10k\text{Hz}$  程度の低周波双共振フィルタに関する二、三の新しい構成法を提案し<sup>(8)</sup>、さらにそれらの試作測定結果について述べるものである。

従来、これら周波数領域の振動子としては、音さ、音片振動子などの単一共振子が実用されてきた。本文ではこれらの構成と異なる新しい双共振子の構成とその実験結果を示す。とくに  $100\text{Hz}$  前後の周波数範囲では音さや音片の寸法は大となり、また  $L, C$  素子でフィルタを構成しようするとインダクタンスがかなり大きくなるために実用的ではなく、適当な機械振動子の開発が望まれている。一方、データ伝送や信号制御などでも機械振動子の開発が切に望まれており、本研究の目的もこれらの需要に答えようとしたものである。

本文ではまずはじめに、方形板二枚をその中央点で細棒で連結した構造の  $50\sim 200\text{Hz}$  程度の低周波双共振フィルタについてのべ、その駆動・描出法（動電形と圧電形）ならびに

その試作フィルタの測定結果を示し、ついで二枚の細長い薄板を十字形に接合した構造をもつ  $5 \sim 10\text{kHz}$  付近で有効な変形双共振音片について述べ、そのフィルタの試作結果を示す。

なお、本文でのべる双共振フィルタの構成原理と等価回路は先に発表した双共振音片や音さの原理と同じであるので、等価回路の論議や設計式の誘導などは省略し、新しい構成法の提案とその諸測定結果を示すことに焦点をおいている。

## 2. 極低周波用の双共振フィルタ

### 2.1 双共振子の構造

低周波用振動子では寸法の小形化のためには、その最低次モードが利用される。方形板や円形板の最低次モードは、その中央点が支持された場合図1 (a), (b) に示すような節線あるいは節直径がひとつ生ずる振動モードである。正方形板あるいは真円の場合は図示のように節線の直交する二つの振動モードが縮退して単一共振を示すが、方形板の辺比調整やコーナ削り落し (図3 (a), 図7 (a) 参照) あるいは円板の周辺一部削り落しなどによって縮退を分離すると双共振特性が得られる。本文では低周波で有効な方形板双共振子だけについてのべるが、構成の原理は円板形状の場合も全く同様である。

図1の状態のままでは支持線も振動子の一部として作用し、消散振動エネルギーも多くな

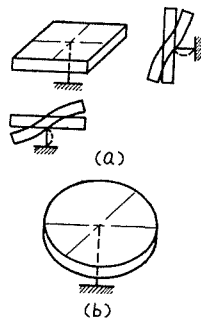


図 1

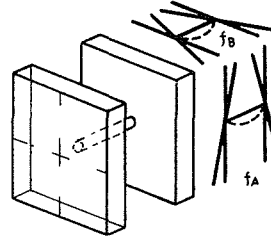


図2 構造と振動モード

り安定な双共振子が得にくいので、図2に示すような構成とする。図2の構成は本章で対象とする極低周波用双共振子である。

本構成では、その振動モードからも予想されるように、方形板（以下音さの呼び方にならいアーム板と呼ぶことにする）が厚く連結棒が細い場合、アーム板は剛体振動のイナーシャとして、また連結棒は両端単純支持の横振動スティフネスとして動作する機械的共振系となる。この共振は図2に示すように直交二モードで成立するから双共振特性を示す。なお、アーム板が薄く連結棒が細くない場合は分布定数系として各共振周波数が決定される<sup>(9)</sup>。

### 2.2 動電形の駆動・描出

剛体振動を行なうアーム板に駆動・抽出端子を設けるには、電磁形変換器を付加する必

要がある。図3(a)はこの種双共振子に駆動・抽出用の動電形変換器をそれぞれ一個使用した場合で、駆動変換器は両振動モードに対し同位相に、抽出用変換器はこれら二モードを互に逆位相に動作させる。なお変換器を四隅に配置する平衡形の構成配置も可能である(図5参照)。また図3(b)のようにコイルもマグネットも双共振子の対向アーム部に接着する構成とすると衝撃に対し安定である。図4および図5はこの種フィルタの測定結果である。図4は未整合の場合で、辺比調整( $a_1 \neq a_2$ )によって縮退モードの分離を行っている。通過域の両側の極は入出力間の誘導結合によって生じたものである。双共振子

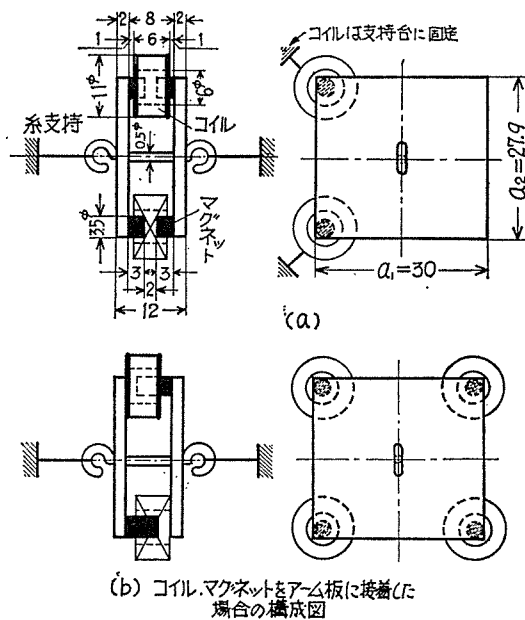


図3 動電形の低周波双共振子

の寸法および支持を図3(a)に示した。本構成では支持の問題、ならびにコイルとマグネットのギャップ調整および入出力間の誘導結合の軽減等の諸問題とその対策が考慮されるべきである。とくに極低周波用では連結棒が相当細くなるから、支持線の張力によって共振周波数が多少変化する。また外部衝撃に対する安定さの点では、コイルをアーム板に固定する図3(b)の構造の方が影響の小さいことが実験的に確かめられた。入出力間の電磁結合は特性の劣化に影響する場合があるので一般には軽減されるように工夫する必要がある。

### 2.3 圧電形の駆動・描出

前節の動電形双共振フィルタは駆動・抽出の点で極低周波用には適しているが、その駆動・抽出変換器の設定や、極低周波での高能率化、支持と外部衝撃等に問題点がある。これに対し圧電形では損失も比較的小さく、入出力間の電氣的結合も問題とならないが、双共振子の駆動に工夫を必要とし余り低い周波数では駆動・抽出が難しくなる。筆者らは、

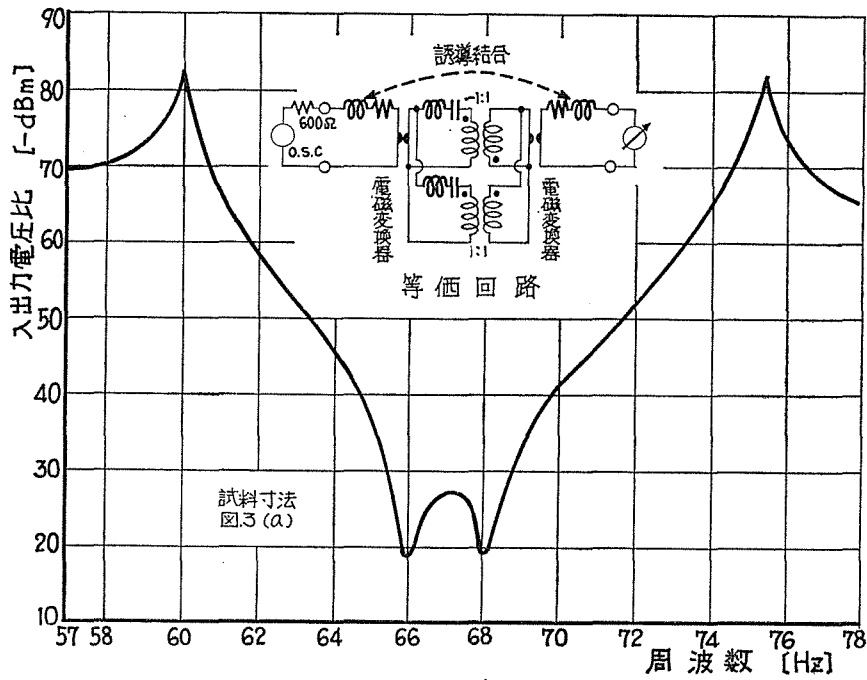


図4 フィルタ特性

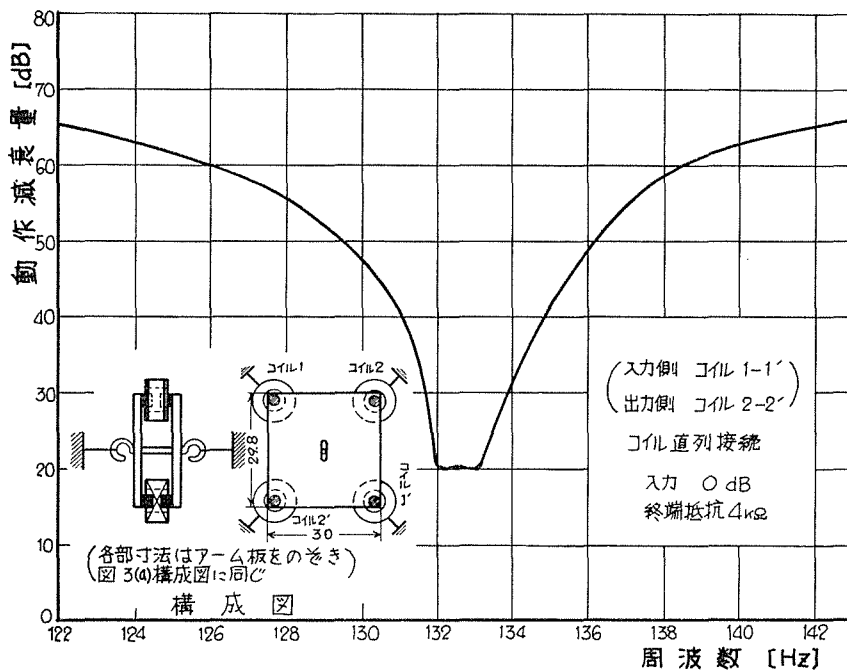


図5 フィルタ特性

双共振フィルタの連結部を図6 (a) に示すようにその中央で振った薄板構成（あるいは同図 (b) に示すように二つの平板を直交接合した構造）とし、さらに圧電磁器を図示のように接着した双共振駆動・抽出変換器を考案し、実験を行ない所期の目的を達することができた。すなわち同図 (c) の矢印で示した方向の二つの横振動は、寸法的材質的に平衡が保たれている場合は縮退しているから、この連結部を図7 (a), (b) のように双共振子の駆動・抽出の変換器として併用することができる。なお図7 (a) の双共振フィルタは図示のように、アーム板の対角線コーナをカットすることによって縮退が分離されている。図7 (c) はその一測定結果で等価回路も付記されている。中心周波数  $f_0 = 190\text{Hz}$ ,

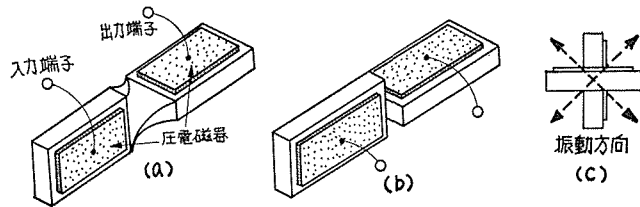


図6 連結部構造

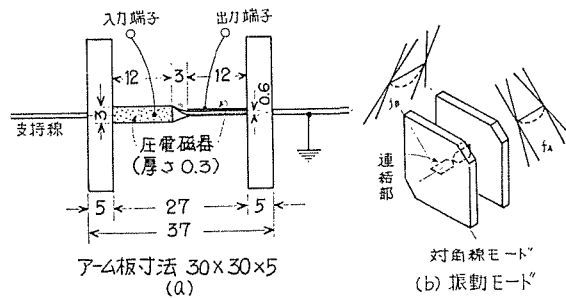


図 7

比帯域巾  $B = 3\%$  を得ており実用化が期待できる。また図7 (a) の側面図を図8 (a) のように表示すると図8 (b) のような別の構成も考えられる。ただし後者の場合の縮退分離は辺比調整によって行なわれる。本構成は動電形のようにコイル位置やマグネットとのギャップ調整などの問題がないのでより実用的であるが、振動子全体の容積は多少大き

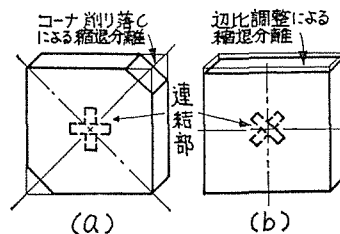


図 8

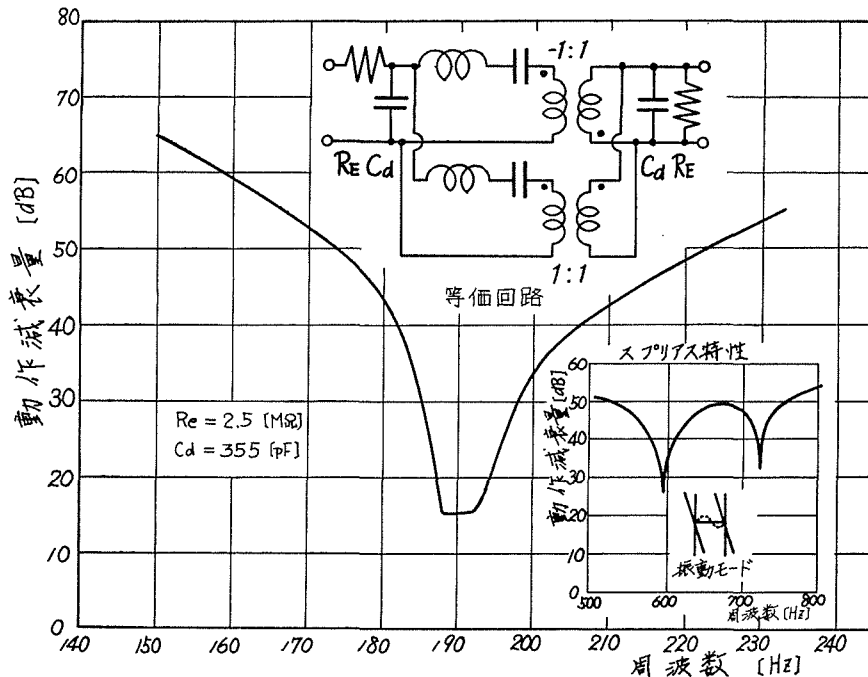


図8 圧電形双共振フィルタ

くなるようである。また平板形状の連結部スティフネスを利用するから前節で述べた構成よりも共振周波数が多少高くなる。連結部のスティフネスを小さくすると双共振周波数はさらに低くなるが、その限度は機械的強度から決定される。これらの考察には連結部スティフネスの解析が必要で、互いに直交する平板の合成スティフネスという新しい問題が提起され、今後の課題となる。なお、図9(a),(b)に示すような電池時計のてんぶ装置を利用して極低周波用共振子が構成される。現在試作実験を行なっているが、将来実用化に当っては本構成との優劣が比較検討されよう。

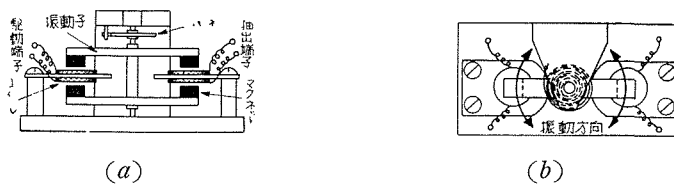


図9 極低周波用共振子

### 3. 十字接合形の双共振音片

#### 3.1 構造

前章でのべた圧電形・低周波用双共振子の連結部の変形薄板（図6）はそれだけで双共振音片として利用できる。図10はその一構成例で細い薄板を中央部でねじったのち、さらに切り切り込みを入れてその部分を細くしたものである。また二枚の薄板を直交させ連結

小片を介して溶接や銀ろう付けを行なってもよい。ここに圧電磁器は図示のように接着し、入出力電気端子とする。本双共振子は両端自由の境界条件をもつから、その適用周波数範囲は前章のものよりも上昇し、数  $kHz$  から  $10kHz$  程度となる。

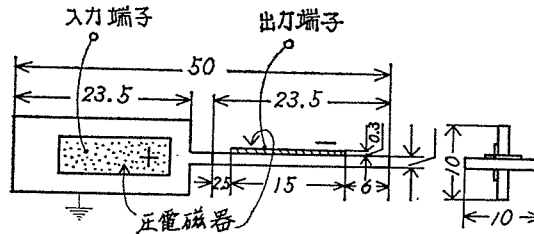


図10 十字接合形双共振子

図10の変形音片が双共振子として動作する理由は、図11 (a) の断面正方形の双共振音片と比較考察すると容易に理解できる。すなわち、図11 (a) では図示のように圧電磁器を接着して駆動・抽出すると、断面の対角線方向でたがいに直交する二つの縮退した横振

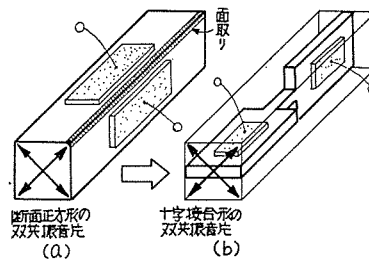


図 11

動モードが得られるから、面取りによってその縮退を分離して双共振特性が得られることを示している。一方、同図 (b) の十字接合形音片は断面正方形の音片から切り出した構成と考えられるから、矢印で示した方向の二つの横振動の共振周波数は、材質的、寸法的に平衡が保たれているときは、相変らず縮退していると考えられる。すなわち、この縮退振動モードになんらかの非対称性をあたえて縮退を分離すると双共振特性を呈すわけである。

### 3.2 振動モード

断面正方形音片から本構成の振動方向が予想されるが、図10の試料についてその振動方向の確認と振動モードの観測を行なった。その結果の一例を図12に示す。振動方向は音片端面を顕微鏡で観測し、図示のような斜め方向の振動であることを確認した。また節点（あるいは節線）は平板上へ石松子をふりかけて観測した。その結果最も強く励振できる振動モードは図12で示すようなモードであることがたしかめられた。また、そのモードは普通の音片の  $2\text{--}nd$  モードに近い振動モードであるが、図示のように二つの振動モードの

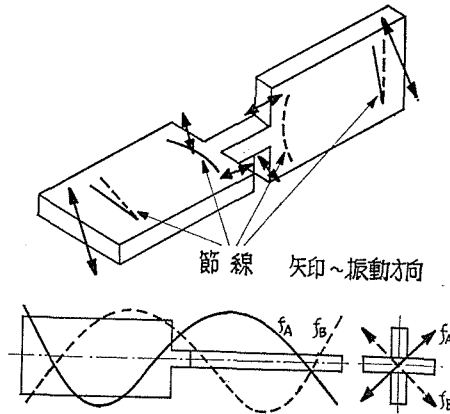


図12 振 動 モ ー ド

節点は一致していない。さらに節点位置についてつぎのような実験を行なった。すなわち、中央連結部と振動板の長さとの比 ( $l_c/l$ ) によって節点位置がどのように変化するかを観測した。図13はその結果で、中央連結部が十分長い場合 ( $l_c/l > 0.175 \sim 0.25$ ) はモード  $f_A$ ,  $f_B$  の節点は等しくかつ普通の均一音片の  $2\text{--}nd$  モードの節点位置 ( $l_n/l = 0.132, 0.5, 0.868$ ) とほぼ等しくなるが、 $l_c/l < 0.175$  では両モードの節点位置は一致しない。振動子の支持は両モードに共通な節点部を支持することが理想的であるから連結部寸法化は少なくとも  $l_c/l > 0.25$  と設定する必要がある。これによりこの変形音片の支持に対する一設計指針が得られた。なおこの設計条件は振動子の寸法比によって異なるので実用化に際しては各試料寸法比について確認しておく必要がある。

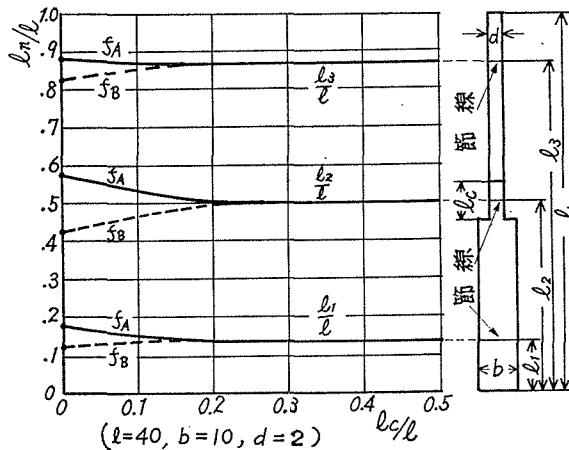


図13 双共振子形状と節点位置

図14は  $l_c/l$  に対する  $2\text{--}nd$  モード (図12参照) および  $1\text{--}st$  モード (図15参照) の共振周波数の変化の様子を示すもので、 $l_c/l$  に対し  $2\text{--}nd$  モードの共振周波数は減少の



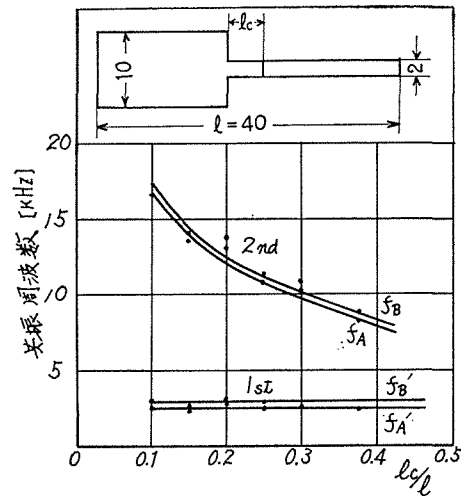


図14 双共振子形状と共振周波数

傾向をしめしているが、1-st モードのそれは無関係にほとんど一定である。また、中央連結部小片  $l_c$  を短くするほど 2-nd モードのレスポンスが減少し消滅することが観測された。従って図15のように連結部を太くすることによって1-st モードを積極的に利用することができる(図22参照)。なお、上記のモードに対するレスポンスの大小は中央連結部によってその振動モードが変移することによるものである。

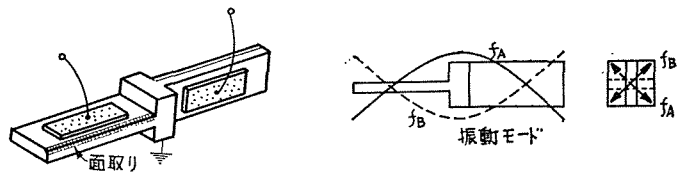


図15 1-st モード利用の双共振子

### 3.3 周波数調整

機械振動子の利用にあたって、共振周波数調整の容易なことは重要な問題である。とくに、双共振子は同一振動子の二つの共振モードを巧みに利用するものであるから、各共振周波数を独立に調整できることが理想的である。一般には多重共振子の周波数調整はその多重利用のため、単一共振子に比較して多少むずかしい。双共振子の共振周波数調整は、その各振動モードや各振動方向の確認の下に一方の共振モードにだけ大きく影響する部分を削り落すことによって行なわれるのが普通である。

図16, 17, 18は中央連結棒が正方形断面の場合、図19, 20は丸棒の場合の双共振子の一部カットによる共振周波数値を示したものである。図16に示す方法では二つの共振周波数は単調に増加し、図17では一方の共振周波数が増加、他方は減少している。図18は中央部連結小片のコーナ削り落しによる方法で二つの共振周波数をより大きく変化できる。また、

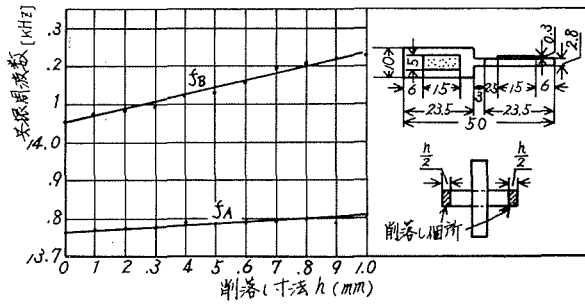


図16 周波数調整法

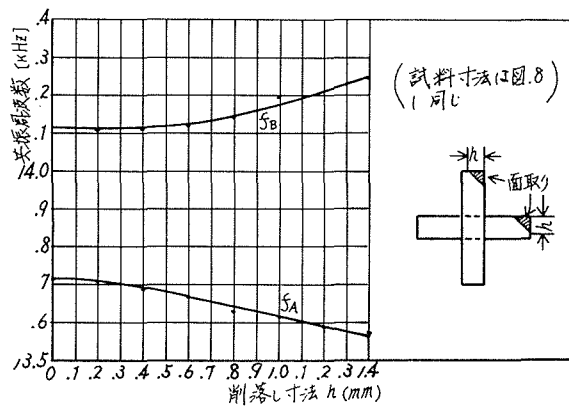


図17 周波数調整法

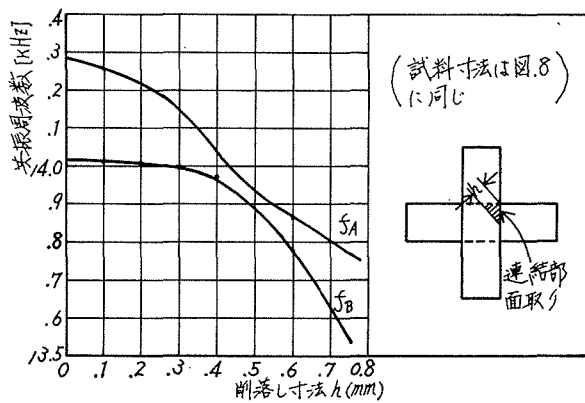


図18 周波数調整法

連結小片が丸棒の場合も連結部カットの 図20 の方法が共振周波数をより大きく変化させることができる。

以上の実験から周波数調整には図18, 図20に示すような中央部連結小片の一部削り落し  
が最も有効で, 他の方法は微調整に適することが実験的にたしかめられた。次節のフィル

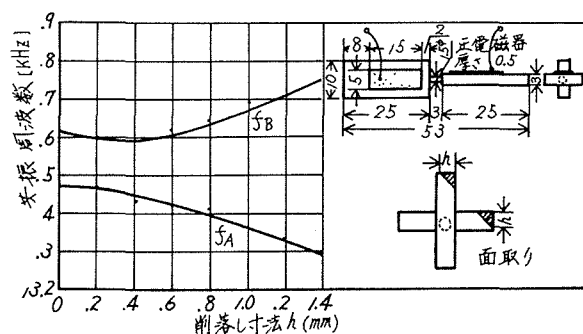


図19 周波数調整法

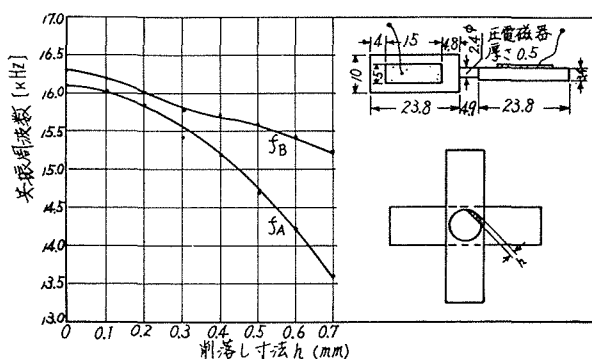


図20 周波数調整法

タ特性の測定においてもこれらの方法を併用して共振周波数の調整を行なった。

### 3.4 双共振フィルタ

図21は十字接合形音片の2-ndモードを用いた場合の双共振フィルタの測定結果である。図中のスプリース・レスポンスは高次振動のモードである。この高次のスプリースは圧電磁器の部分接着や、 $l_c/l > 0.2$ として共通接点を支持することによって減少できる。また、図中の減衰極は二つの共振モードの等価インダクタンス( $L_1, L_2$ )の相異が大きいために生じたものである。さらに、図15に示すような構造とすると1-stモードのレスポンスが大きくなり、フィルタとして利用することもできる。図22はその一試作測定結果である。ただしこの場合の双共振周波数調整は図15中に示すように両側の接合平板のコーナー削り落しによって容易に行なわれる。

なお参考のために、図23で示すようなネック形の平板音片の周波数レスポンスの一測定結果を示しておく。この種形状では単に一方に横振動するだけであるから双共振現象はみられない。すなわち十字接合形音片とすることによって、はじめて接近した直交双共振モードが生じ低周波用の双共振フィルタとして使用することができる。

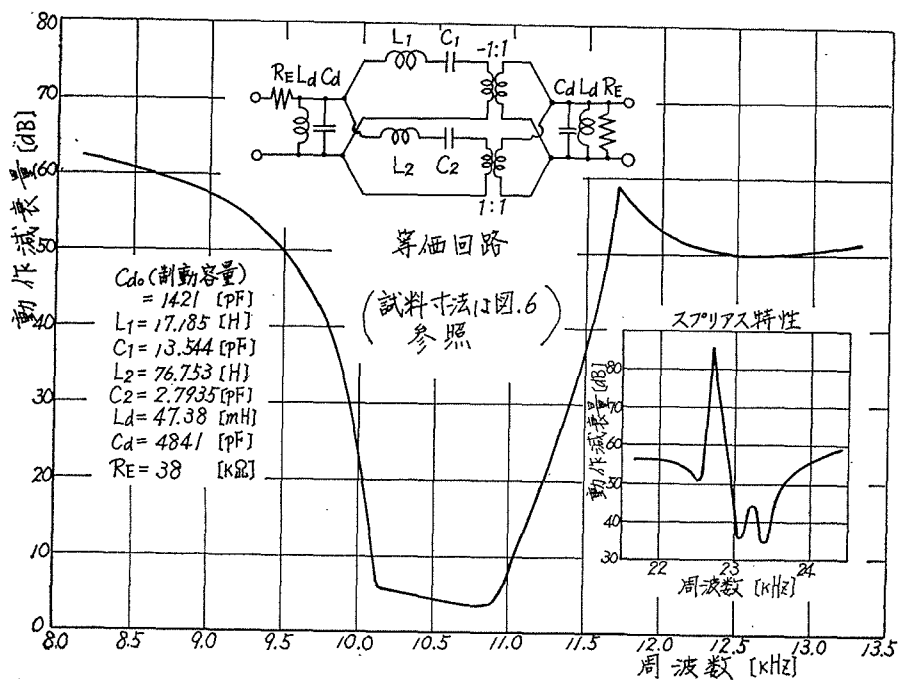


図21 2-nd モード利用のフィルタ特性

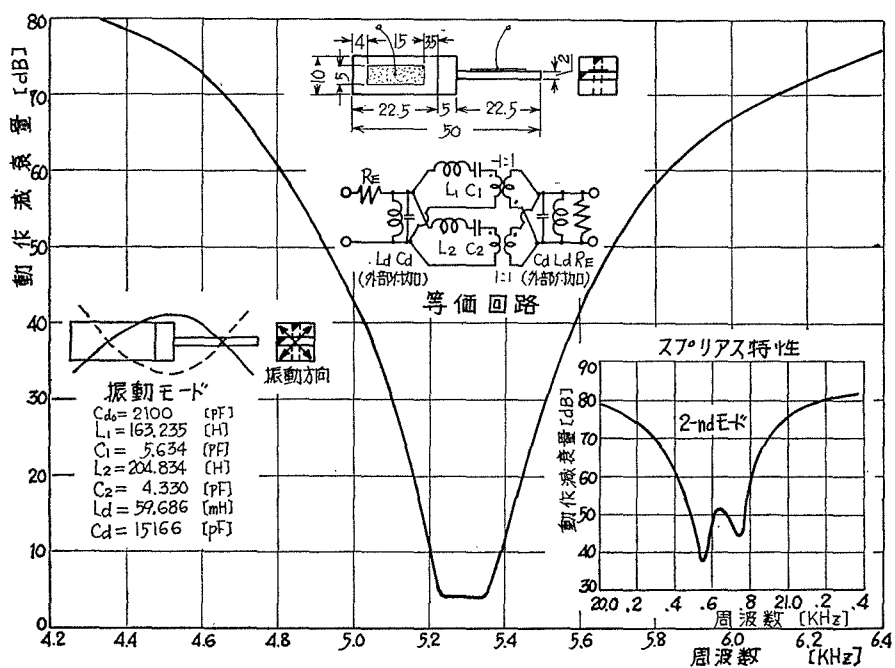


図22 1-st モード利用のフィルタ特性

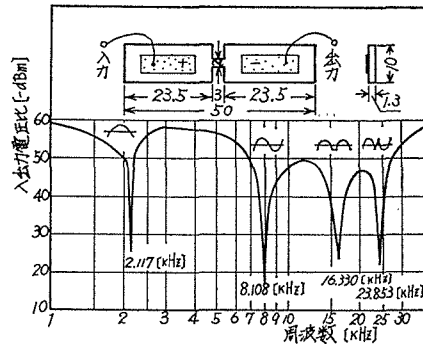


図23 ネック形音片の周波数特性

### 3.5 十字接合形音片の特徴

前述したように、この十字接合形音片は断面正方形双共振音片の変形とかがえられるから、その特徴を断面正方形、双共振音片と比較対応してまとめると次のようになる。(1) 周波数調整のための削り落とし位置は、 $2\text{--}nd$  モードの場合は中央の連結部も効果的で、 $1\text{--}st$  モードのときは両平板のコーナ部が有効である。これらの実験結果は先に発表した断面正方形双共振音片<sup>(4)</sup>とは全く逆の結果で、その理論的根拠は振動モードの解析をまたなければならない。(2) 断面正方形音片に比較し高次スプリアスモードの抑圧は多少むずかしいようである。図21、図22の測定結果からもわかるように比較的近いところにスプリアスモードがある。ただし圧電磁器の部分接着その他によりさらに軽減することができる。(3) 十字接合形音片の幅と長さを断面正方形音片のそれと等しくえらんだ場合の両双共振音片の共振周波数は、図21、図22の試料と比較すると次のようになる。

	十字接合形音片	断面双共振音片
$2\text{--}nd$ モード利用	10.5kHz	58kHz
$1\text{--}st$ モード利用	5.3kHz	20kHz

これより十字接合形の方がより低周波化に適することがわかる。

以上から十字接合形の双共振音片は断面正方形双共振音片よりも相当低周波化、あるいは小形化ができることがわかる。

## 4. むすび

はじめに、剛体振動利用の新しい低周波用双共振子について、動電形の駆動・描出方法ならびに連結部を圧電的に駆動・描出する方法によって 100Hz 前後でもフィルタ構成の可能なことを示した。つぎに、十字接合形双共振音片の  $2\text{--}nd$  あるいは  $1\text{--}st$  モード利用のフィルタ試作結果について二、三の実験結果を示した。平板をその中央部でねじるかあるいは接合することにより、この種低周波双共振子は比較的簡単に作れることがわかった。また最後に断面正方形双共振音片との比較検討も行ない、同一振動子容積で、より低周波化が可能なことを示した。

以上、低周波用の双共振フィルタについてのべたが容量比と比帯域巾の関係、スプリアスなどその振動モードの理論的な解析にもとづいて検討すべき問題も多いが、本文ではその構成方法と二、三の実験結果を報告した。

最後に、本研究に際し実験に御協力いただいた卒業研究生の管原正明君（現在電々公社勤務）に御礼申し上げる。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費の補助を受けた。

（本研究の一部は電子通学会講演会，その他で発表した<sup>(9)</sup>。）

## 文 献

- (1) F. Künemund und K. Trand ; “Mechanische Filter mit Biegeschwinger” Frequenz Bd. 12. Nr. 19. (1904).
- (2) R. A. Johnson ; “A Twin Tee Multimode Mechanical Filter” Proc. IEEE. 54. (Letter). (Dec. 1966).
- (3) 十文字，尾上 ; “たて・屈曲多重モード圧電振動子”，昭和41信学全国大，142.
- (4) 近野，富川 ; “双共振音片振動子を用いた電気・機械フィルタ” 信学誌，50. 8. p. 1426. (昭42—08).
- (5) 清水，中村 ; “直交する円形縮退モードを用いた多重モード共振子と圧電フィルタ”. 信学超音波研・資料 US. 67—24. (1968—02).
- (6) 富川，近野ほか ; “双共振子を用いた有極形の複合メカニカル・フィルタ” 日本音響学会講演 No. 1—1—3, 1—1—4 (昭44—04), 昭44電通学全国大会No. 180, 181, 182.
- (7) 富川，近野 ; “三重モード音片振動子を用いた電気・機械フィルタ”. 電通学論文誌 52—A, 2 (昭44—02).
- (8) 近野，富川，青木 ; “低周波用双共振フィルタ” 電通学全国大会S9—5. (昭43—10). チタン酸バリウム実用化研究会 (昭43—9).
- (9) 近野，青島，中村 ; “H形振動子とその応用” 山形大紀要（工）Vol. 10 No. 2. (昭44—03).

## New Constructions and Experimental Results of Multi-mode Filters in Low Frequencies.

Y. Tomikawa, T. Aoki, and M. Konno.

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering

Recently, multi-mode filters consisting of multi-resonances of one vibrator attract much attention. This paper deals with new constructions and experimental results of multi-mode filters in low frequencies.

First, the constructions, driving methods and experimental results of the multi-mode filters in low frequencies of 50~200Hz are described. These filters are constructed by combining two square plates of double resonance and one coupler.

Second, multi-mode filters at the center frequency of 5~10kHz are treated. These filters are easily constructed by connecting two rectangular thin plates crosswise, and are of small size.

The filters in this paper will be more available, because L-C filters in low frequencies of about 100Hz become very large.